

# ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ ФОСФИДА ИНДИЯ И АРСЕНИДА ИНДИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Н. П. КЕКЕЛИДЗЕ, Г. П. КЕКЕЛИДЗЕ, Г. Н. ЕРИЦЯН, К. О. ОВЧАРЕНКО,  
Т. М. ГОГАШВИЛИ, Р. А. МЕЛКОНЯН, Н. Е. ГРИГОРЯН

Кристаллы  $\text{InP}$  и  $\text{InAs}$   $n$ -типа проводимости были облучены быстрыми электронами с энергией 50 Мэв и дозой до  $\Phi = 6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>. До и после облучения исследовано инфракрасное поглощение вблизи края, на свободных носителях и на колебаниях решетки.

Исследование радиационных явлений в полупроводниковых кристаллах  $\text{InP}$  и  $\text{InAs}$  представляет большой научный интерес в силу их исключительно важных физических свойств и широкой возможности создания на их базе высокоэффективных электронных приборов.

Исследуемые кристаллы были получены с помощью горизонтальной зонной плавки. После выполнения соответствующих обработок и измерений кристаллы облучались на инжекторе кольцевого ускорителя Ереванского физического института быстрыми электронами с энергией 50 Мэв и дозой до  $6 \cdot 10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>. При облучении температура образцов поддерживалась близкой к комнатной.

Исследованные кристаллы были электронного типа проводимости и имели исходную концентрацию носителей тока ( $2 \cdot 10^{16}$ — $3 \cdot 10^{18}$ ) см<sup>-3</sup> в  $\text{InAs}$  и ( $1,1 \cdot 10^{16}$ — $1,6 \cdot 10^{17}$ ) см<sup>-3</sup> в  $\text{InP}$ . Изучение оптических свойств до и после облучения проводилось при температурах  $T = 300, 80$  и  $15^\circ\text{K}$ . Спектры пропускания снимались на установках ИКС-14, «Перкин-Элмер» 457 и UR-10 в интервале длин волн 0,8—40 мкм. По измеренным значениям пропускания на ЭВМ Проминь-2 определялась величина коэффициента поглощения  $K$ .

Облученные кристаллы отжигались в кварцевых ампулах, которые откачивались до  $10^{-4}$  мм рт. ст. с последующей закалкой в воде со льдом. Отжиг образцов проводился при температурах 200 и  $500^\circ\text{C}$  в течение  $t = 0,5, 1$  и 3 час и с добавлением мышьяка для кристалла арсенида индия. Исследовалось оптическое поглощение в области края, поглощение на свободных носителях и на колебаниях решетки.

Облучение быстрыми электронами вызывает увеличение поглощения в области, примыкающей к длинноволновому краю полосы фундаментального поглощения, рис. 1 и 2 («хвосты» поглощения). С увеличением дозы величина этого поглощения растет, форма края приобретает менее крутой характер, но сам край, в отличие от ранее исследованного нейтронного облучения [1], сохраняет наблюдаемый экспоненциальный характер типа Урбаха [2] в зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона

$$K = K_0 e^{\left( \frac{h\nu - E_g}{E_s} \right)}, \quad (1)$$



где  $E_0 = \frac{kT}{\sigma}$ ,  $\sigma$  — величина, зависящая от параметров материала и температуры.

В работе [3] был предложен механизм, объясняющий «аномальную» частотную зависимость коэффициента поглощения [1]. Было отмечено, что наблюдаемое явление является результатом проявления двух процессов: взаимодействия носителей с продольными оптическими фононами и появления хвостов плотности состояний в запрещенной зоне в результате флуктуаций заряженных примесей. В работе [1] было высказано предположение, что радиационные дефекты действуют аналогичным образом. Как известно, облучение высокоэнергетичными частицами создает в решетке точечные дефекты, их скопления или большие разупорядоченные области. Заметим, что как показано в работах [1, 4], в кристаллах InP радиация рождает разупорядоченные области, а в InAs — дефекты точечного типа. Точечные дефекты играют роль заряженных примесей, а разупорядоченные области окружены слоем объемного заряда [5]. Эти дефекты могут вызвать локальные изменения потенциала, что, в конечном счете, приводит к образованию хвостов плотности состояний. Эта модель, выдвинутая для случая нейтронного облучения [1], хорошо объясняет также результаты экспериментов с быстрыми электронами. Из рис. 1 видно, что облучение кристаллов InP значительными дозами приводит к смещению кривой поглощения в длинноволновую область, т. е. имеет место поглощение при энергиях, значительно меньших ширины запрещенной полосы материала —  $E_g$ . Такая же картина наблюдается и для InAs. Однако в этом случае ситуация несколько осложняется из-за наличия эффекта Бурштейна, вызывающего сдвиг в обратную сторону. Появление эффекта Бурштейна, в свою очередь, есть результат значительного увеличения концентрации носителей при облучении быстрыми электронами [4].

Среднюю величину глубины хвоста характеризует значение  $E_0$  (см. (1)). В таблице приведены некоторые типичные экспериментальные значения  $E_0$ . До облучения при комнатной температуре для InAs  $E_0 = 8-10$  Мэв, что целиком вызвано фононным уширением. Расчеты по теории указанного взаимодействия [6] дают  $E_0 = 8$  Мэв. При увеличении дозы облучения  $E_0$  растет для InAs до 27 Мэв, а для InP от 18,5 до 54 Мэв. Величину  $E_0$ , связанную с «радиационными хвостами», можно оценить на основе теории Эфроса и Шкловского [7].

Большее значение  $E_0$  для фосфида индия вызвано тем, что из-за малой массы атома фосфора (масса атома As более чем в два раза превосходит массу атома P) радиация вызывает более сильное разрушение в решетке InP. Большое исходное значение  $E_0$  в InP есть следствие большего значения величины плотности продольных оптических фононов и большей концентрации примесей по сравнению с InAs.

Измерения, проведенные при низких температурах, показывают, что с понижением температуры  $E_0$  падает в InAs до 10 Мэв при  $T = 15^\circ\text{K}$ , что вызвано исчезновением фононного взаимодействия.



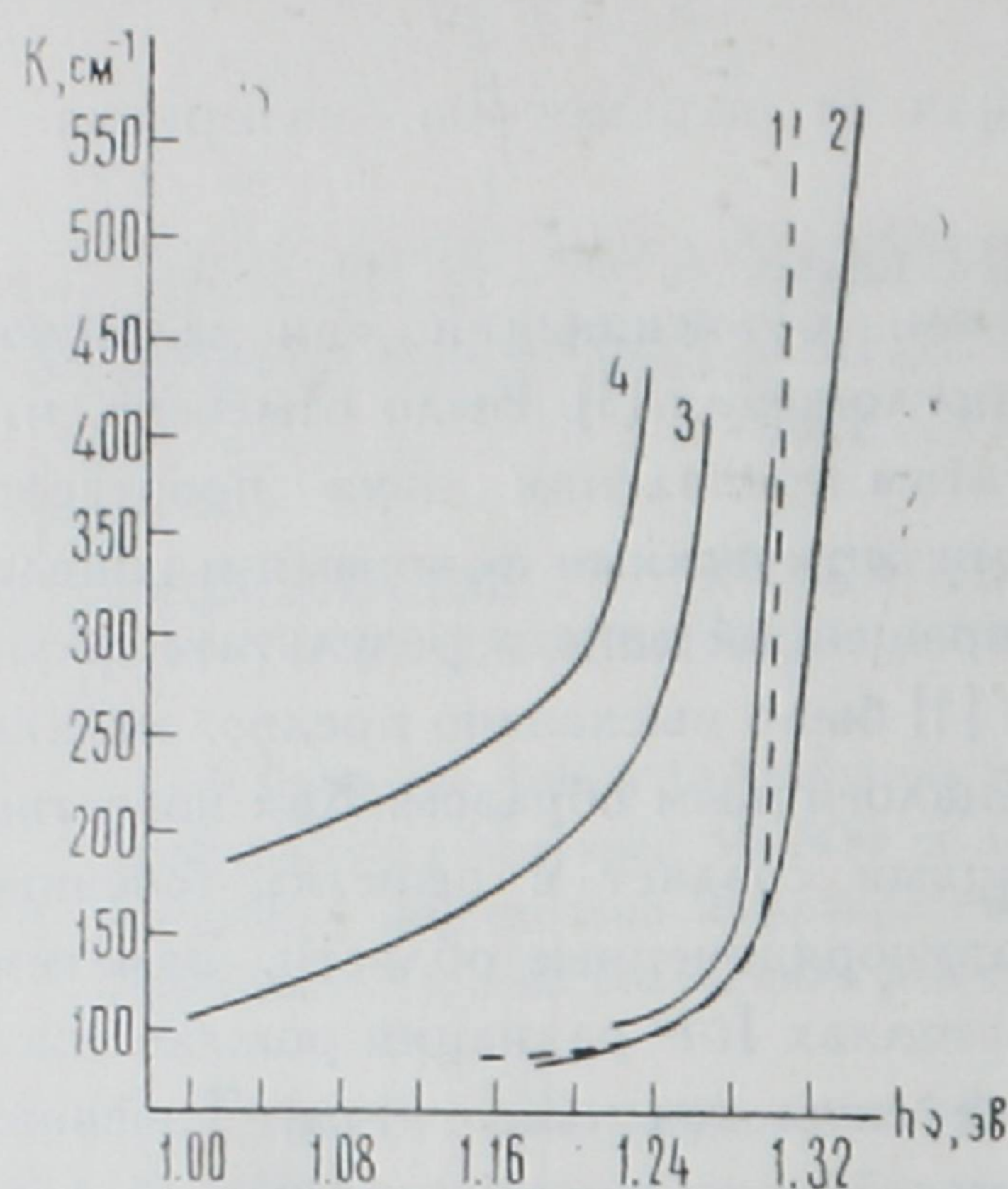


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента в InP с  $n_0 = 1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300^\circ\text{K}$ : 1 — до облучения; 2 —  $\Phi = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ; 3 —  $\Phi = 6,0 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ ; 4 — после отжига при  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 0,5 \text{ час}$ ; 5 — после отжига при  $T = 500^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ час}$ .

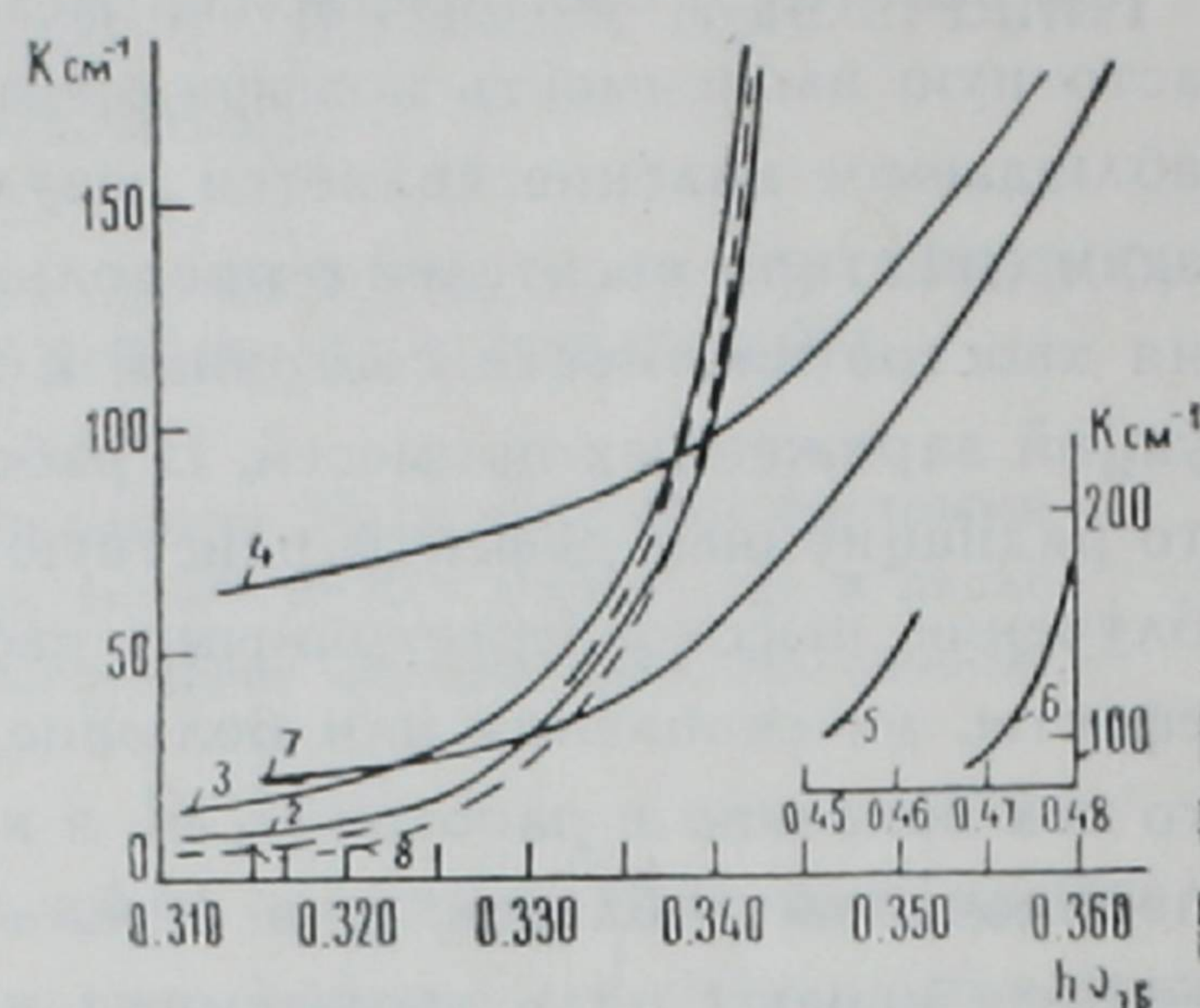


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента поглощения у края в InAs с  $n_0 = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ : 1 — до облучения; 2 —  $\Phi = 2,0 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ; 3 —  $\Phi = 4,5 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ; 4, 5, 6 — при  $\Phi = 6,0 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$  и соответственно при  $T = 300, 80$  и  $15^\circ\text{K}$ ; 7 — после отжига при  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 0,5 \text{ час}$ ; 8 — после отжига при  $T = 500^\circ\text{C}$ ,  $t = 3 \text{ час}$ .

Таблица

Зависимость значения  $E_0$  от дозы облучения и режима отжига кристаллов InAs и InP (в единицах Мэв)

|      | $\text{см}^{-3}$     | До облучения | $2 \cdot 10^{16}$<br>эл/см <sup>2</sup> | $4,5 \cdot 10^{16}$<br>эл/см <sup>2</sup> | $1 \cdot 10^{17}$<br>эл/см <sup>2</sup> | $6 \cdot 10^{17}$<br>эл/см <sup>2</sup> | Отжиг<br>200°C | Отжиг<br>500°C |
|------|----------------------|--------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|----------------|
| InAs | $2 \cdot 10^{16}$    | 8,0          | 9,0                                     | 10,0                                      | 13,5                                    | 27,0                                    | 17,0           | 8,0            |
| InAs | $1,73 \cdot 10^{17}$ | 8,4          |                                         |                                           |                                         |                                         |                | 9,0            |
| InAs | $5,6 \cdot 10^{17}$  | 8,0          | 9,0                                     | 11,0                                      |                                         | 19,0                                    |                |                |
| InP  | $1,1 \cdot 10^{16}$  | 18,5         | 30,0                                    |                                           |                                         | 54,0                                    | 75,0           | 19,0           |

Как видно из таблицы, высокотемпературный отжиг, выполненный при  $500^\circ\text{C}$ , приводит к восстановлению величины  $E_0$ . Практически к исходному значению возвращаются и кривые поглощения в области края (рис. 1 и 2). При температуре  $200^\circ\text{C}$  осуществляется переходный процесс, направленный в этой стадии в сторону дальнейшего развития процесса.

Изучалось также поглощение на свободных носителях. Показано, что как до, так и после облучения коэффициент оптического поглощения на электронах описывается степенной зависимостью типа

$$K = a\lambda^p.$$

В кристаллах InAs с низкой концентрацией электронов  $p$  увеличивается с ростом потока электронов, а при  $n > 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  — уменьшается. Это вызвано изменением характера рассеяния носителей и переходом к классическому случаю Друде-Лоренца [8].



Изучение комбинационного поглощения и решеточных спектров отражения показало, что облучение быстрыми электронами указанной дозой не вносит ощутимых изменений в динамику кристаллической решетки. На рис. 3 показаны спектры пропускания чистого InAs с концентрацией

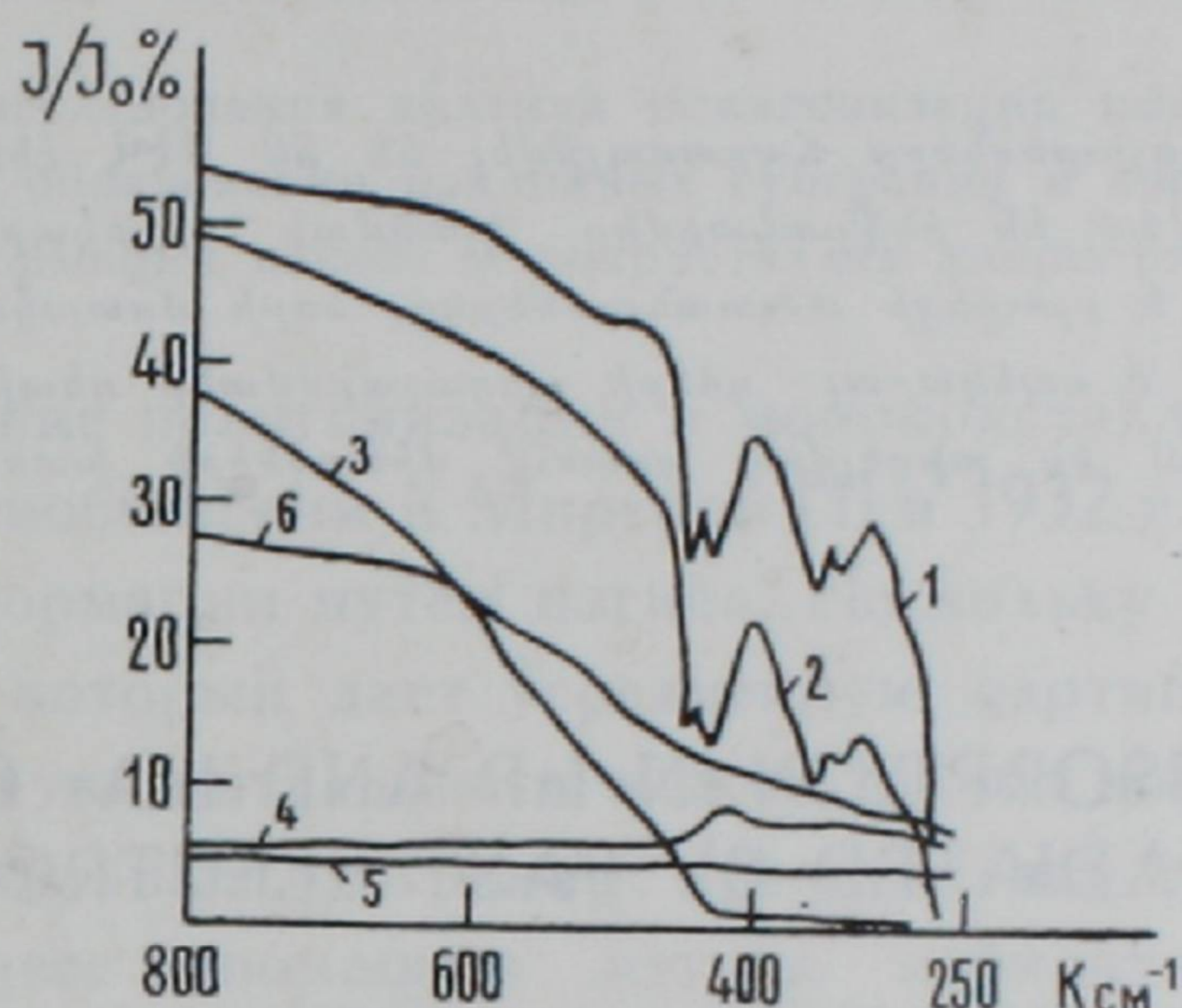


Рис. 3. Комбинационное поглощение в InAs с  $n_0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ : 1—до облучения; 2— $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ; 3— $\Phi = 4,5 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ; 4— $\Phi = 6 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ ; 5 — после отжига при  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 0,5 \text{ час}$ ; 6 — после отжига при  $T = 500^\circ\text{C}$ ,  $t = 3 \text{ час}$ .

$n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Наблюдаемые пики комбинационного поглощения на колебаниях решетки постепенно исчезают с ростом интегрального потока. Отжиг при режиме  $T = 500^\circ\text{C}$  и  $t = 3 \text{ час}$  частично восстанавливает пропускание, но пики поглощения все еще не появляются. Предполагается, что полное восстановление оптического спектра в этой области произойдет при более высокой температуре.

Тбилисский государственный университет  
Ереванский физический институт

Поступила 20.X.1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. P. Kekelidze, G. P. Kekelidze. Proceedings of the International Conference: Reading, 1972, paper 47, p. 387.
2. F. Urbach. Phys. Rev., 92, 1324 (1953).
3. N. P. Kekelidze, G. P. Kekelidze. Phys. Lett., 42, 129 (1972).
4. Н. П. Кекелидзе и др. Сообщения АН ГССР, 76, 333 (1974).
5. B. R. Gossiek. J. Appl. Phys., 30, 1214 (1959).
6. D. Duun. Phys. Rev., 174, 855 (1968).
7. Б. Шкловский, А. Эфрос. ФТП, 4, 305 (1970).
8. Н. П. Кекелидзе и др. Сообщения АН ГССР, 73, 1 (1974).



ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԿԼԱՆՈՒՄԸ ԻՆԴԻՈՒՄԻ ՖՈՍՖԻԴԻ ԵՎ ԱՐՍԵՆԻԴԻ  
ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԲԱՐՁՐ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐՈՎ  
ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ն. Պ. ԿԵԿԵԼԻԶԵ, Գ. Պ. ԿԵԿԵԼԻԶԵ, Հ. Ն. ԵՐԻՏՅԱՆ, Կ. Օ. ՕՎՉԱՐԵՆԿՈ,  
Թ. Մ. ԳՈԳԱՇՎԻԼԻ, Ռ. Ա. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ, Ն. Ե. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

n-տիպի InP և InAs բյուրեղները ճառագայթվել են 50 ՄԷՎ էներգիայով օժտված էլեկտրոններով: Ուսումնասիրված են ինֆրակարմիր կլանման սպեկտրները՝ պայմանավորված ազատ հոսանքակիրներով և բյուրեղի տատանումներով, եզրի մոտակայքում: Ցույց է տրված, որ ճառագայթումը բերում է սպեկտրալ զծերի տեղաշարժմանը դեպի երկարալիք տիրույթ: Արդյունքները բացատրվում են արգելված գոտում վիճակների խտության պոչիկների առաջացմամբ:

OPTICAL ABSORPTION IN InP AND InAs CRYSTALS  
IRRADIATED BY FAST ELECTRONS

N. P. KEKELIDZE, G. P. KEKELIDZE, G. N. YERITSYAN, K. O. OVCHARENKO,  
T. M. GOGASHVILI, R. A. MELKONYAN, N. E. GRIGORYAN

InP and InAs crystals were irradiated by 50 MeV electrons. The optical absorption in the edge region, in regions of electron and lattice absorption was measured.